МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE

УДК 621.311.24 10.23947/1992-5980-2017-17-4-61-68

Оптимизация форм геометрии раструба ветроэнергетической установки типа «ротор в раструбе»*

В. А. Костюков[1], М. Ю. Медведев[2], А. М. Маевский[3], Н. К. Полуянович[4], В. В. Савченко[5]**
[1, 2, 3, 4] Южный федеральный университет, г. Таганрог, Российская Федерация
[5] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Optimization of geometry forms for wind mill mouth of the “rotor-in-socket” type***

V. A. Kostyukov[1], M. Y. Medvedev[2], A. M. Maevskiy[3], N. K. Poluyanovich[4], V. V. Savchenko[5]
[1,2,3,4] Southern Federal University, Taganrog, Russian Federation
[5] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Введение. В статье рассматриваются метод и результаты аэродинамического исследования вертикально-осевых ветроэнергетических установок (ВЭУ) с осесимметричным статором. Цель работы — демонстрация перспективности использования вертикально-осевых ветроэнергетических установок указанного типа в народном хозяйстве.
Материалы и методы. Для выполнения поставленных задач использовался метод виртуальной аэродинамической обдувки и соответствующей оптимизации конструкции по заданному критерию. В рамках указанного метода выполнены численные аэродинамические исследования одиночного ротора заданного типа, а также рассматриваемой системы «ротор + раструб» до и после оптимизации при заданных параметрах невозмущенного потока и вращения ротора. При сопоставлении мощности полученной оптимизированной конструкции ВЭУ с аналогами при прочих равных условиях использован метод аэродинамического подобия.
Результаты исследования. Получены характерные картины аэродинамического обтекания исследованного типа ВЭУ до и после оптимизации. Рассмотрены характерные распределения скалярных и векторных полей при заданных параметрах невозмущенного потока и вращения ротора. Построены графики зависимостей от линейной скорости набегающего потока для проекций момента на валу ротора (при стандартной и оптимизированной формах ВЭУ), а также для соответствующих полезной и побочной мощностей. Проведено сравнение по мощности рассматриваемой оптимизированной ВЭУ с аналогами при прочих равных условиях.
Обсуждение и заключения. Показана перспективность использования вертикально-осевых ВЭУ с осесимметричным статором, предназначенным для создания полезной интерференции с ротором с целью увеличения полезной мощности на валу. Такие ветроэнергетические установки не только не уступают, но и могут превосходить, по крайней мере в среднем, соответствующие классические вертикально-осевые конструкции.

Introduction. The method and results of the aerodynamic research of the vertical axis wind power plants (WPP) with an axisymmetric stator are considered. The work objective is to show the application perspectiveness of vertical axis wind-power plants of the specified type for the national economy.
Materials and Methods. The technique of virtual aerodynamic blasting and the corresponding design optimization at the specified criterion are used to perform the tasks. Within the framework of this technique, numerical aerodynamic analysis of a single rotor of the given type, and of the “rotor + socket” system before and after the optimization at the specified parameters of the freestream and rotor spinning is performed. When comparing the power of the obtained optimized WPP design with analogs, other things being equal, the aerodynamic similarity method is used.
Research Results. Representative patterns of the aerodynamic flow around the investigated WPP type are obtained before and after the optimization. The distinctive distributions of the scalar and vector fields at the given parameters of the freestream and rotor spinning are studied. Dependent graphs are plotted against the linear freestream velocity for the projections of the rotor shaft moment (with WPP standard and optimized forms), as well as for the corresponding useful and side powers. A comparison of the power of the optimized WPP under consideration, and analogues, other factors being equal, is made.
Discussion and Conclusions. The application perspectiveness of the vertical axis wind turbines with an axisymmetric stator designed to create useful interference with the rotor in order to increase useful shaft power is shown. Such wind power plants meet and exceed, at any rate upon the average, the corresponding classical vertical axis structures.

*Работа выполнена по гранту № 213.01-07-2014/01ПЧВГ.
**E-mail: wkost-einheit@yandex.ru, medvmihal@sfedu.ru, maevskiy_andrey@mail.ru, nik1-58@mail.ru
***The research is done within the frame of Grant no. 213.01-07-2014/01PCHVG.

Ключевые слова: ветроэнергетическая установка с осесимметричным статором, полезная аэродинамическая мощность, оптимизированная конструкция, распределения аэродинамических полей, сравнение по мощности с аналогом.

Keywords: wind power plant with axisymmetric stator, useful aerodynamic power, optimized design, aerodynamic field distribution, power comparison with analog.

Образец для цитирования: Оптимизация форм геометрии раструба ветроэнергетической установки типа «ротор в раструбе». В. А. Костюков, [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2017. — Т. 17, № 4. — С. 61–68.

For citation: Kostyukov V. A., Optimization of geometry forms for wind mill mouth of the “rotor-in-socket” type. V. A. Kostyukov, M. Y. Medvedev, A. M. Maevskiy, N. K. Poluyanovich, V. V. Savchenko. Vestnik of DSTU, 2017, vol. 17, no.3, pp. 61–68.

Введение. Проблема повышения эффективности существующих ветроэнергетических установок (ВУ), состоит в том, что имеющееся на сегодняшний день оборудование ограниченно использует энергию ветра. Проблема не может быть решена без аэродинамических исследований, направленных на определение оптимальных по эффективности геометрических форм роторов и статоров ВУ, а в перспективе — их комплексов. При этом, безусловно, должны учитываться заданные природные, технологические ограничения и лимит себестоимости.

В последнее время распространяется использование ВУ, имеющих ротор не репеллерного (горизонтального), а вертикального типа. При этом диаметр ВУ может быть увеличен (без пропорционального роста себестоимости) до значительно больших размеров, чем допускает конструкция с горизонтальной осью вращения.

Известны усовершенствованные конструкции ВУ с ротором Дарье, не уступающие ВУ с горизонтально-осевыми роторами [1, 2]. Изначальная форма этого ротора представляет собой симметричную конструкцию, состоящую из двух и более аэродинамических крыльев, закрепленных на радиальных балках. На каждое из крыльев, движущихся относительно потока, действует подъемная сила, величина которой зависит от угла между векторами скоростей потока вращающегося крыла.

В [3] предложена установка планетарного типа, работающая на основе эффекта Магнуса [4] следующим образом: дополнительную подъемную силу создают вращающиеся вокруг своей оси цилиндрические элементы ротора — сателлиты. Они расположены центрально симметрично, равномерно по периметру ротора и приводятся во вращение дополнительными электродвигателями. Суммарная подъемная сила всех сателлитов порождает соответствующий осевой момент вращения ротора.

За счет использования специальных направляющих элементов конструкции статора (лопаточного направляющего аппарата и двухзаходной улитки) удается добиться направленности потока в окрестности ротора практически перпендикулярно его оси по радиусу вращения. При этом, как замечает автор [4], удается достичь полезной мощности, в два-три раза превышающей соответствующую мощность классических ВУ при прочих равных условиях.

В работе рассматривается перспективный вариант повышения эффективности использования энергии ветра — компоновка ВУ вместе со специальным обтекателем. Простейшей такой компоновкой, давно и широко используемой в воздухоплавании, авиации и мореходном деле, является ротор в кольце. При этом значительно уменьшаются потери, вызванные отрывом потока на концах лопастей [5]. Кроме того, использование вместе с кольцом еще и выходного устройства (раструба) приводит к значительному уменьшению минимальной скорости запуска ротора (до 45% от скорости ветра).

Анализ ветровых роторов с направлением набегающего потока параллельно оси вращения показал, что использование определенных форм раструбов приводит к значительному повышению (до 40% по сравнению со случаем одиночного ротора) максимального значения коэффициента использования энергии ветра (КИЭВ), хотя соответствующий удельный коэффициент, полученный нормировкой на площадь Миделева сечения потока, меньше, чем для случая отдельного ротора.

При этом случай ортогональной ориентации обдувающего потока по отношению к оси ротора в кольце до сих пор в должной мере не рассматривался. Тем более не были рассмотрены случаи компоновки с выходными обтекателями различных типов.

В связи с этим представляется актуальным решение задачи о влиянии формы и размеров раструба на роторы ветроколес с вертикальной осью вращения, когда набегающий ветровой поток примерно ортогонален этой оси.

Идея использования раструба заключается в возникновении вертикальной силы тяги за счет перепада давления между верхней и нижней частями раструба в силу закона Бернулли. Данный перепад может быть использован при проектировании такой формы ротора, которая более эффективно использовала бы вертикальный поток.

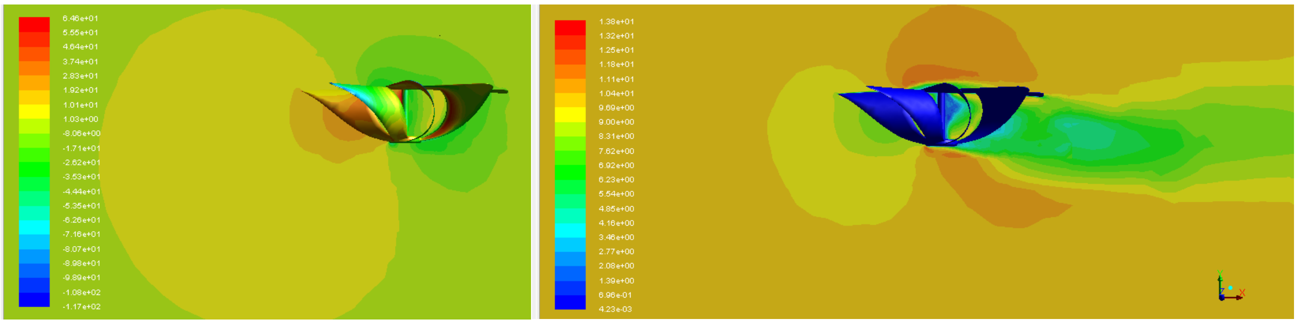
С другой стороны, над одиночным ротором возникает вихревая структура, которая сносится по набегающему потоку ветра. В результате большая часть энергии этой структуры просто рассеивается. Наличие же раструба, осесимметричного ротору, может способствовать локализации энергии этого вихря внутри раструба над ротором и уменьшению скорости его рассеивания. Благодаря этому появляется возможность более эффективно использовать эту энергию ротором при решении задачи оптимизации форм ротора [6], раструба и их ориентации.

Основная часть. Базовое множество форм раструба насчитывало 5 различных геометрий раструба и компоновок его с ротором. В результате исследования, проведенного по алгоритму [7], была получена геометрия раструба, оптимальная с точки зрения заданного критерия и заданной совокупности базовых форм. Ниже рассматриваются некоторые характерные распределения аэродинамических величин для трех случаев: ротора без раструба, роторов с раструбами первоначальной и оптимизированной форм. Для этих случаев были использованы следующие условия: скорость потока $V = 28$ м/с, угловая скорость вращения ротора $f = 6{,}28$ рад/с, гравитация учитывалась**.**

Моделирование аэродинамики ВУ проводилось методом скользящих сеток. Число ячеек комплексной сетки, состоящей из подвижной и вращающейся частей, насчитывало порядка 1,2 млн элементов. В качестве модели турбулентности была выбрана модель Спаларта — Алмараса. Эта модель дает хорошие результаты для пограничных слоев, характеризующихся положительными градиентами давлений.

Обдувка без раструба. Рассмотрим результаты для обдувки одиночного ротора заданной формы. В результате расчета воздействующий на ротор момент оказался равным: M (Mx, My, Mz) = (–4,65; 3,83; 5,83), Н·м.

На рис. 1 представлены характерные распределения статического избыточного давления (*a*) и модуля вектора скорости (*b*).

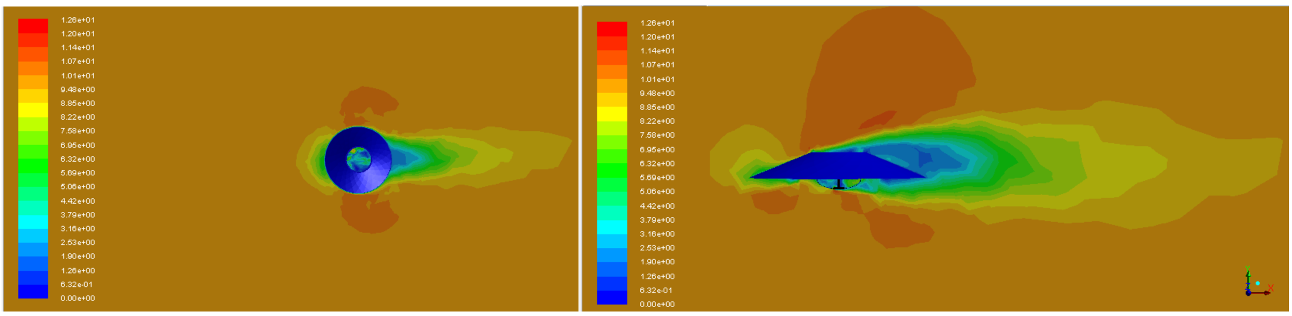


a) *b*)

Рис. 1. Характерные распределения для случая одиночного ротора: распределение статического избыточного давления в плоскости *OXY* (направление набегающего потока на рисунке — справа налево) (*a*); скоростное распределение в плоскости *OXY* (*b*)

Fig. 1. Representative distributions for single rotor case: static pressurization distribution in OXY plane (wind-stream direction in the figure is from right to left) (a); high-speed distribution in OXY plane (b)

Обдувка ротора с раструбом исходной формы. Результаты исследования аэродинамической нагрузки для исходной формы раструба представлены на рис. 2.



a) *b*)

Рис. 2. Характерные распределения для случая системы «ротор + раструб» исходной формы: распределение модуля скорости в плоскости, параллельной *OXZ* и смещенной на 0,2 м в отрицательном направлении оси *OY* (*a*); распределение модуля скорости в плоскости *OXY*, в которой лежит вектор скорости невозмущенного потока ветра ($V_{wx} = 3 м/с$, $V_{wy} = V_{wz} = 0$) (*b*)

Fig. 2. Representative distributions for “rotor + socket” system of natural form: velocity modulus distribution in plane parallel to OXZ and displaced by 0.2 m in negative OY -axis direction (a); velocity modulus distribution in OXY plane in which the velocity freestream vector lies ($V_{wx} = 3 м/с$, $V_{wy} = V_{wz} = 0$) *(b)*

Воздействующий на ротор момент оказался равным:

$$M\ (Mx,\ My,\ Mz) = (-0{,}74;\ 2{,}01;\ 0{,}833),\ Н·м.$$

Значения этих проекций приведены в базовой системе координат на рис. 2.

На рис. 3 показано распределение избыточного статического давления в плоскости *OXY*.

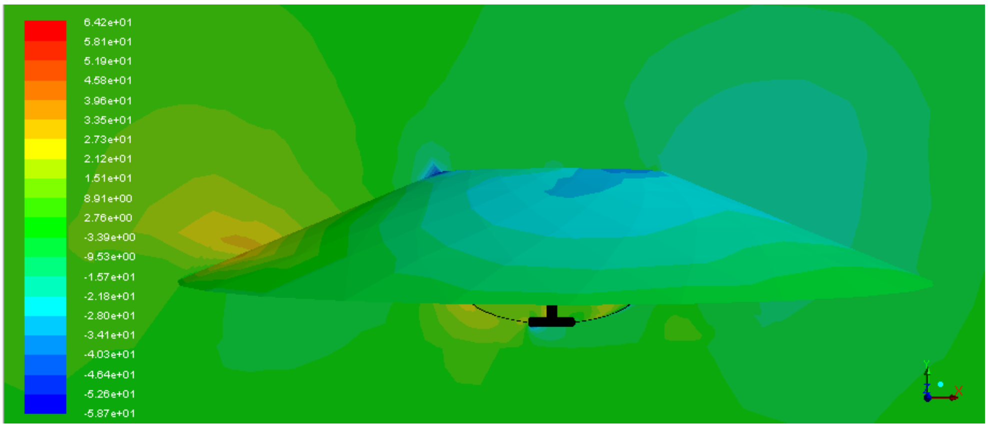


Рис. 3. Распределение избыточного статического давления в плоскости *OXY*

Fig. 3. Static pressurization distribution in OXY plane

Учитывая изложенное, можно сделать следующий вывод. Распределения модуля скоростей в плоскости *OXZ* во внешней части раструба качественно соответствуют обтеканию цилиндра (рис. 2, *а*), а во внутренней области соответствуют картине обтекания вращающихся многолопастных структур. Кроме того, из рис. 2 следует, что изменение модуля скорости вдоль оси *OY* во внутренней области раструба и его внешней окрестности значительно и требует дополнительного изучения с целью обеспечения большего разрешения потоковых и вихревых структур.

Очевидно, что вихревая структура над ротором в значительной степени сносится по направлению набегающего потока (рис. 2, *б*).

Эффект Бернулли вызывает дополнительную вертикальную тягу вверх, что способно значительно усилить вращательное воздействие на лопасти крыльчатки ротора заданной формы. Однако из распределения статического давления (рис. 3) следует, что при данных исходных форме и размерах раструба перепад давлений между верхней и нижней частями раструба недостаточен для его продуктивного использования.

Результаты оптимизации формы раструба. По разработанному алгоритму была проведена оптимизация исходной формы раструба, которая позволила увеличить на 25 % вращающий аэродинамический момент, а, следовательно, и полезную мощность, возникающие на роторе при одних и тех же условиях ($V_{w1} = 10 м/с$, $\omega = 6,28 рад/с$) по сравнению со случаем без раструба. Эти ключевые результаты сведены в таблице 1.

Таблица 1
Table 1

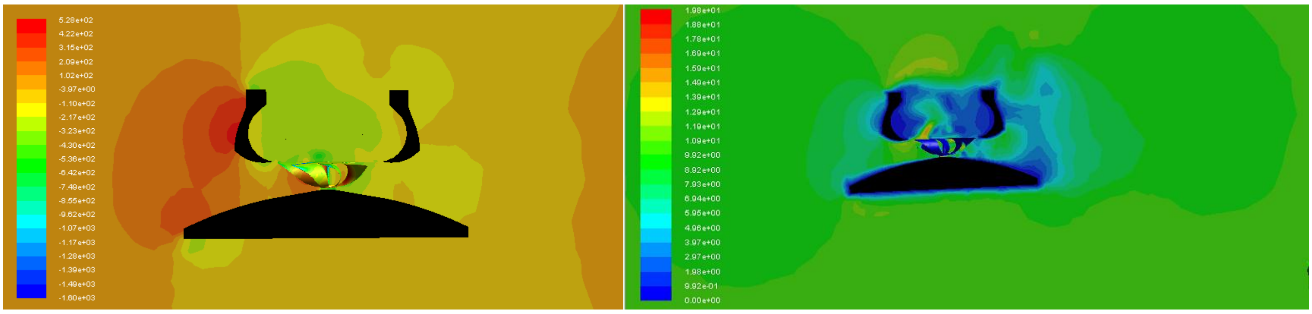
Сравнительные результаты для трех характерных случаев ВУ

Comparative results for three typical cases of WPP

Расчетная величина	Момент силы (Н·м) при различных конструкциях раструба		
	Без раструба	С первоначальным раструбом	С оптимизированным раструбом
Mx	4,65	0,74	4,10
Mz	5,83	0,833	2,84
My	**3,83**	**2,01**	**4,65**

Первоначальная форма раструба обеспечивает вращающий момент, примерно в два раза меньший, чем в случае без раструба. Это говорит о степени влияния формы раструба на вращающий осевой момент ротора: при модификации этот момент увеличивается на 125 % по сравнению с исходными формой и компоновкой раструба.

На рис. 4 приведены характерные распределения для случая системы «ротор + раструб» оптимизированной формы.



a)   *b*)

Рис. 4. Характерные распределения для случая системы «ротор + раструб» оптимизированной формы: распределение избыточного статического давления в плоскости *OXY* (*a*); распределение модуля скорости в плоскости *OXY* (*b*)

Fig. 4. Representative distributions for "rotor + socket" system of optimized form: static pressurization distribution in OXY plane (a); velocity modulus distribution in OXY plane (b)

Как видно из рис. 4, *a*, распределение статического избыточного давления по вертикали внутри раструба становится более неравномерным, что усиливает вертикальную тягу и повышает эффективность использования данной формы ротора. Наличие раструба также приводит к значительному увеличению доли составляющей момента *My* (табл.1) по отношению к *Mx* и *Mz*, т. е. по сравнению со случаем без раструба (для обеих рассмотренных его форм) отмечается уменьшение по модулю отношений *Mx*/*My*, *Mz*/*My*. Это способствует снижению паразитного воздействия на ось ротора и росту устойчивости всей конструкции ВУ.

Полученные результаты показывают, что наличие раструба определенной формы позволяет увеличить значение аэродинамической мощности одиночного ротора минимум на 25 %.

Расчет аэродинамической мощности оптимизированной ВУ. Выполним расчет мощностей полученной оптимальной формы ВУ с имеющимся аналогом ВУ классического типа. Для этого сопоставим вычисленное значение момента *My* для полученной оптимальной формы установки с параметрами описанной в [3] ВЭУ-500 Днепропетровского КБ «Южное»:

— мощность — 500 кВт;
— расчетная скорость ветра — 12,9 м/с;
— диаметр винта *D*2 = 38,3 м;
— расстояние от основания до оси ветроколеса — 35 м;
— масса ветроагрегата — 48 т.

Полезная мощность оптимизированной ВУ, рассмотренной выше, может быть рассчитана по формуле

$$P_1 = M_y(Vw, \omega) \cdot \omega \cdot \langle \eta_{red} \rangle \cdot \langle \eta_{gen} \rangle , \tag{1}$$

где $\langle \eta_{red} \rangle$, $\langle \eta_{gen} \rangle$ — средние величины КПД редуктора и генератора, значения которых принадлежат, как правило, следующим диапазонам: $\eta_{red} = 0{,}9 \div 0{,}95$, $\eta_{gen} = 0{,}7 \div 0{,}9$ [8–10].

Если бы установка имела диаметр D_2, то вращающий момент, порождаемый ею при скорости $V_{w2} = 12{,}9\,м/с$ и угловой скорости вращения ротора $\omega = 6{,}28\,рад/с$, был бы равен [10]:

$$P_2 = P_1 \left(D_2 / D_1 \right)^3 \left(V_{w2} / V_{w1} \right)^2 = 1034\ кВт . \tag{2}$$

Здесь с достаточной для практики точностью предположено, что безразмерный коэффициент момента вращения при таком масштабировании не изменяется.

Таким образом, если бы ротор полученной нами оптимальной формы ВУ имел диаметр D_2 и весьма небольшую угловую скорость вращения $\omega = 6{,}28\,рад/с$, то эта установка имела бы выходную мощность, более чем в два раза превышающую соответствующую мощность описанной в [3] ВУ классического типа при стандартных условиях ее функционирования.

Из рис. 5 видно, что значение момента M_y существенно увеличивается при переходе порога скорости в 20 м/с за счет изначально разработанной конструкции раструба.

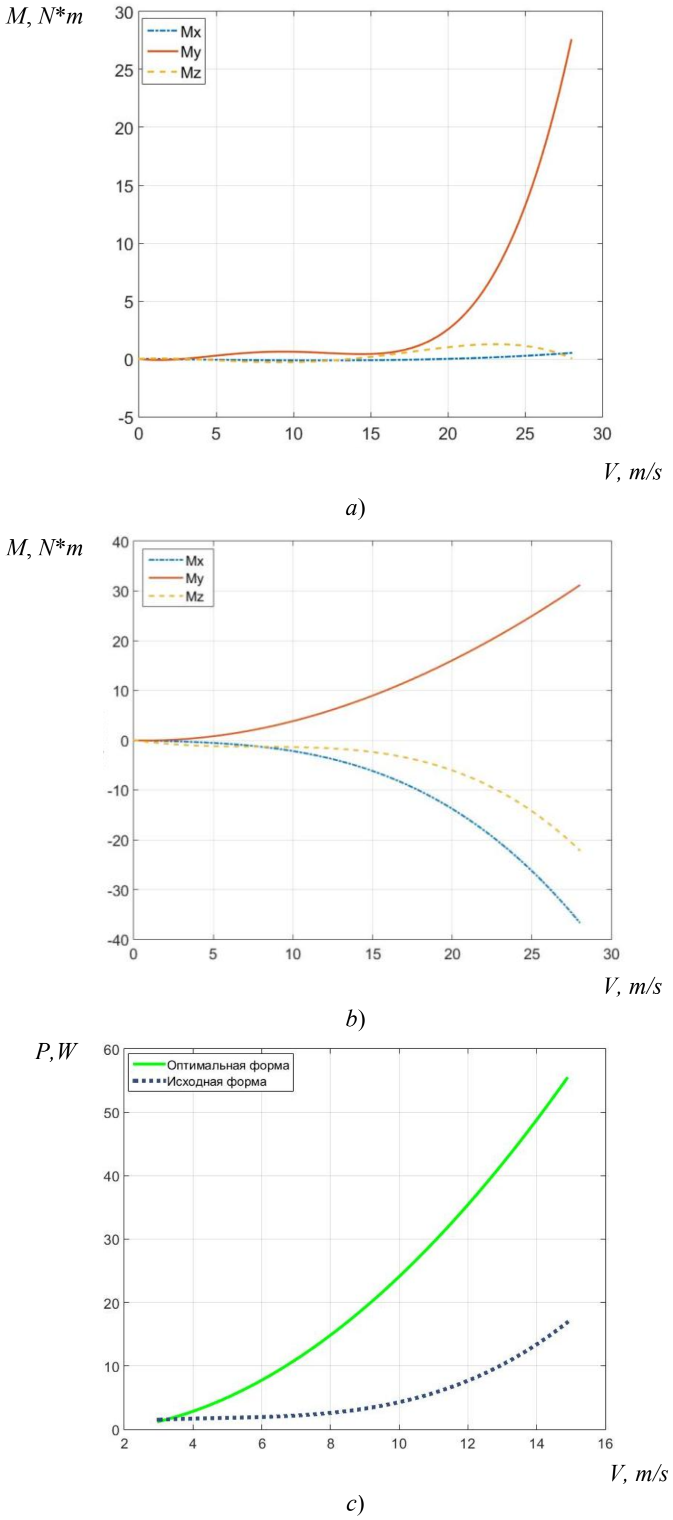


Рис. 5. График зависимостей: моментов (M_x , M_y , M_y) стандартной формы ВУ от линейной скорости V набегающего потока (*a*); моментов (M_x , M_y , M_z) оптимизированной формы ВУ от линейной скорости V набегающего потока (*b*); аэродинамических мощностей P стандартной и оптимизированной формы от скорости V набегающего потока (*c*)

Fig. 5. Dependency graph: moments (M_x , M_y , M_y) of WPP standard form on linear velocity V of free-stream flow (a); moments (M_x , M_y , M_z) of WPP optimized form on linear velocity V of free-stream flow (b); aerodynamic capacities P of WPP standard and optimized forms on free-stream flow velocity V (c)

Из графиков также видно, что несущественным образом изменяются моменты M_x и M_z . Это показывает, что большая часть силы ветра, воздействующей на ВУ по осям *OX* и *OZ*, используется в результате вращения ВУ.

Рассмотрим результаты моделирования ВУ с оптимизированной геометрией (рис. 5, *б*). Оптимизация геометрии позволила увеличить аэродинамический момент на роторе ВУ более чем в 2 раза. Также из графика видно, что в данном случае увеличиваются моменты M_x M_z . Это значит, что часть энергии, получаемая от силы ветра, рассеива-

ется и не используется ВУ. Таким образом, ожидаемым результатом дальнейшей оптимизации формы является существенное уменьшение разброса энергии ветра и его концентрация на вращательном моменте M_y. На рис. 5, *в* представлен график зависимости рассчитанной аэродинамической мощности стандартной и оптимизированной ВУ.

Итак, разработанная оптимизированная ВУ демонстрирует существенное (более чем в 2,5 раза) увеличение вырабатываемой мощности (рис. 5). При средней скорости 8–10 м/с разработанная ВУ будет вырабатывать от 900 Вт/ч до 1,5 кВт/ч.

Выводы. Полученные результаты показывают, что использование оптимизированных форм раструбов ВУ является перспективным и не уступает в эффективности формам, рассмотренным в [1–4]. При этом значительно уменьшаются потери, вызванные отрывом потока на концах лопастей [5]. Кроме того, использование вместе с кольцом еще и выходного устройства (раструба) приводит к значительному уменьшению минимальной скорости запуска ротора (до 45 % от скорости ветра). Использование определенных форм раструбов позволяет существенно (до 40% по сравнению со случаем одиночного ротора) повысить значение коэффициента использования энергии ветра.

Использование раструба позволяет создать вертикальную силу тяги за счет перепада давлений между верхней и нижней частями раструба по закону Бернулли. Данный перепад может быть использован при проектировании такой формы ротора, при которой вертикальный поток используется более эффективно. Получены оптимальные формы раструба при заданном роторе и соответствующая компоновка усовершенствованного раструба с ротором. Их применение обеспечивает максимальное среднее значение полезной аэродинамической мощности ветрового потока ротора на заданном диапазоне ветровых нагрузок. Распределение статического избыточного давления по вертикали внутри раструба становится менее равномерным, что усиливает вертикальную тягу и повышает эффективность использования данной формы ротора (рис. 4). Раструб значительно увеличивает долю составляющей момента My по отношению к Mx и Mz, т. е. происходит уменьшение по модулю отношений Mx/My, Mz/My в сравнении со случаем без раструба для обеих рассмотренных его форм (рис. 4). Это способствует уменьшению паразитного воздействия на ось ротора и повышению устойчивости всей конструкции ВУ.

Библиографический список

1. Твайделл, Дж. Возобновляемые источники энергии / Дж. Твайделл, А. Уэйр. — Москва : Энергоатомиздат, 1990. — 392 с.

2. Горелов, Д. Н. Энергетические характеристики ротора Дарье /Д. Н. Горелов // Теплофизика и аэромеханика. — 2010. — Т. 17, № 3. — С. 325–333.

3. Михненков, Л. В. Ветроэнергетическая станция планетарного типа / Л. В. Михненков // Научный вестник МГТУ. — 2008. — № 125. — С. 16–24.

4. Михненков, Л. В. Ветроэнергетическая установка планетарного типа / Л. В. Михненков // Научный вестник МГТУ. — 2002. — № 49. — С. 110–113.

5. Хаскин, Л. Я. Аэродинамика ветроколеса с обтекателем и выходным устройством / Л. Я. Хаскин // Ученые записки ЦАГИ. — 1993. — Т. 24, № 4. — С. 217–222.

6. Устройство для преобразования кинетической энергии ветра в механическую энергию : патент 2552635 Рос. Федерация : F03D3/04 / В. В. Савченко, В. С. Степанов. — № 2013144670 ; заявл. 07.10.13 ; зарегистр. 08.05.15 ; опубл. 10.06.15, Бюл. № 16. — 4 с.

7. Юрьев, Б. Н. Аэродинамический расчет вертолетов / Б. Н. Юрьев — Москва : Государственное издательство оборонной промышленности, 1956. — 176 с.

8. Петров, К. П. Аэродинамика тел простейших форм / К. П. Петров. — Москва : Факториал, 1998. — 231 с.

9. Краснов, Н. Ф. Аэродинамика. Часть 1. Основы теории. Аэродинамика профиля и крыла / Н. Ф. Краснов. — Москва : Высшая школа, 1976. — 255 с.

10. Дубяго, М. Н. Оценка и прогнозирование изоляционных материалов силовых кабельных линий / М. Н. Дубяго, Н. К. Полуянович, В. Х. Пшихопов // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2015. — № 7 (168). — С. 230–237.

References

1. Twidell, J., Weir, T. Vozobnovlyaemye istochniki energii. [Renewable energy resources.] Moscow: Energoatomizdat, 1990, 392 p. (in Russian).

2. Gorelov, D.N. Energeticheskie kharakteristiki rotora Dar'ye. [Energy characteristics of Darreus rotor.] Thermophysics and Aeromechanics, 2010, vol. 17, no. 3, pp. 325–333 (in Russian).

3. Mikhnenkov, L.V. Vetroenergeticheskaya stantsiya planetarnogo tipa. [Planetary wind station.] The Scientific Bulletin of MSTU, 2008, no. 125, pp. 16–24 (in Russian).

4. Mikhnenkov, L.V. Vetroenergeticheskaya ustanovka planetarnogo tipa. [Planetary aerogenerator.] The Scientific Bulletin of MSTU, 2002, no. 49, pp. 110–113 (Ekspluatatsiya vozdushnogo transporta i remont aviatsionnoy tekhniki. Bezopasnost' poletov. [Operation of air transport and repair of aviation equipment. Safety of flights.]) (in Russian).

5. Khaskin, L.Y. Aerodinamika vetrokolesa s obtekatelem i vykhodnym ustroystvom. [Aerodynamics of windwheel with radome and output device.] TsAGI Science Journal, 1993, vol. 24, no. 4, pp. 217–222 (in Russian).

6. Savchenko, V.V., Stepanov, V.S. Ustroystvo dlya preobrazovaniya kineticheskoy energii vetra v mekhanicheskuyu energiyu: patent 2552635 Ros. Federatsiya: F03D3/04. [Device for transformation of wind kinetic energy into mechanical energy.] Patent RF, no. 2552635, 2015 (in Russian).

7. Yuryev, B.N. Aerodinamicheskiy raschet vertoletov. [Aerodynamic analysis of helicopters.] Moscow: Gos. izd-vo oboronnoy promyshlennosti, 1956, 176 p. (in Russian).

8. Petrov, K.P. Aerodinamika tel prosteyshikh form. [Aerodynamics of simply-shaped bodies.] Moscow: Faktorial, 1998, 231 p. (in Russian).

9. Krasnov, N.F. Aerodinamika. Chast' 1. Osnovy teorii. Aerodinamika profilya i kryla. [Aerodynamics. Part 1. Theory fundamentals. Airfoil and wing aerodynamics.] Moscow: Vysshaya shkola, 1976, 255 p. (in Russian).

10. Dubyago, M.N., Poluyanovich, N.K., Pshikhopov, V.Kh. Otsenka i prognozirovanie izolyatsionnykh materialov silovykh kabel'nykh liniy. [Assessment and forecasting the insulation of power cable lines.] Izvestiya SFedU. Engineering Sciences. 2015, no. 7 (168), pp. 230–237 (in Russian).

Поступила в редакцию 19.06.2017
Сдана в редакцию 20.06.2017
Запланирована в номер 25.09.2017

Received 19.06.2017
Submitted 20.06.2017
Scheduled in the issue 25.09.2017

Об авторах:

Костюков Владимир Александрович,
доцент кафедры «Электротехника и мехатроника» Южного федерального университета (филиал) (РФ, 347922, г. Таганрог, Некрасовский пер. 44, корп. Д), кандидат технических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-6116-9999
wkost-einheit@yandex.ru

Медведев Михаил Юрьевич,
заведующий кафедрой «Электротехника и мехатроника» Южного федерального университета (филиал) (РФ, 347922, г. Таганрог, Некрасовский пер. 44, корп. Д), доктор физико-математических наук, профессор,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5205-3572,
medvmihal@sfedu.ru

Маевский Андрей Николаевич,
техник НИИ робототехники и процессов управления Южного федерального университета (филиал) (РФ, 347922, г. Таганрог, Некрасовский пер. 44, корп. Д),
ORCID: http://orcid.org/0000- 0002-0985-1851
maevskiy_andrey@mail.ru

Полуянович Николай Константинович,
доцент кафедры «Электротехника и мехатроника» Южного федерального университета (филиал) (РФ, 347922, г. Таганрог, Некрасовский пер. 44, корп. Д), кандидат технических наук, доцент,
ORCID: http://orcid.org/0000- 0001-5941-1355
nik1-58@mail.ru

Савченко Василий Владимирович,
ведущий инженер управления научных исследований Донского государственного технического университета (РФ, 344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина,1),
ip_kovaleva13@mail.ru

Authors:

Kostyukov Vladimir A.,
associate professor of the Electrical Engineering and Mechatronics Department, Southern Federal University (branch) (RF, 347922, Taganrog, Nekrasovskiy per., 44, building D), Cand.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-6116-9999
wkost-einheit@yandex.ru

Medvedev, Mikhail Yu.,
head of the Electrical Engineering and Mechatronics Department, Southern Federal University (branch) (RF, 347922, Taganrog, Nekrasovskiy per., 44, building D), Dr.Sci. (Phys.-Math.), professor,
ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5205-3572,
medvmihal@sfedu.ru

Maevskiy, Andrey N.,
technician of Research and Development Institute of Robotics and Control Systems, Southern Federal University (branch) (RF, 347922, Taganrog, Nekrasovskiy per., 44, building D),
ORCID: http://orcid.org/0000- 0002-0985-1851
maevskiy_andrey@mail.ru

Poluyanovich, Nikolay K.,
associate professor of the Electrical Engineering and Mechatronics Department, Southern Federal University (branch) (RF, 347922, Taganrog, Nekrasovskiy per., 44, building D), Cand.Sci. (Eng.), associate professor,
ORCID: http://orcid.org/0000- 0001-5941-1355
nik1-58@mail.ru

Savchenko, Vasily V.,
senior engineer of the Scientific Research Department, Don State Technical University (RF, 344000, Rostov-on-Don, Gagarin Square, 1),
ip_kovaleva13@mail.ru